

PENGUKURAN EMPIRIS PERUBAHAN KEKAKUAN DINAMIK BAHAN BETON PERKERASAN KAKU MENGUNAKAN METODE SASW (*Spectral Analysis of Surface Wave*)

**Sri Atmaja P. Rosyidi
Gendut Hantoro
Mohd. Raihan Taha,
Khairul Anuar Mohd. Nayan**

ABSTRAKSI

Dalam konstruksi perkerasan kaku jalan, parameter kekakuan bahan dalam tinjauan modulus elastisitas bahan digunakan untuk data perencanaan dan kontrol terhadap kualitas konstruksi. Penggunaan pengujian laboratorium untuk menentukan nilai modulus elastisitas menjadi tidak efisien karena dalam pengambilan data memerlukan sampel sehingga dinilai mahal dan memakan waktu. Dengan demikian perlu diusulkan suatu pengujian yang mampu mendeteksi nilai modulus elastisitas lapangan yang lebih efisien dan akurat.

Makalah ini bertujuan memprediksi perubahan kekakuan dinamik bahan (modulus elastisitas beton) menggunakan teknik *Spectral Analysis of Surface Wave* (SASW) yang dilakukan pada model fisik perkerasan kaku. Metode SASW memanfaatkan sifat perambatan gelombang seismik yang dihasilkan dari sumber mekanik buatan. Gelombang dalam model perkerasan direkam melalui dua sensor berfrekuensi tinggi dan analisis digital data ditampilkan dalam spektrum fungsi perpindahan dan nilai koheren. Data kedua spektrum tersebut dianalisis untuk membangun kurva dispersi kecepatan fase. Melalui proses inversi dihasilkan nilai kecepatan gelombang geser (representasi terhadap modulus elastisitas dinamik) dan kedalaman profil.

Hasil studi menunjukkan bahwa teknik SASW mampu mengukur perubahan parameter dinamik kekakuan bahan beton pada perkerasan kaku jalan. Nilai modulus yang dihasilkan berkorelasi positif terhadap nilai modulus dari korelasi empiris ACI 318. Hasil modulus elastisitas dari studi ini bersesuaian dengan studi yang dilakukan oleh Nazarian & Stokoe (1984) dan Rix *et al.* (1990).

Kata Kunci : SASW, modulus elastisitas beton, perkerasan kaku

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Teknik evaluasi yang berkemampuan menilai parameter dan kapasitas struktur perkerasan pasca konstruksi yang dilakukan tanpa memberikan sembarang kerusakan pada jalan merupakan suatu tuntutan yang diperlukan pada masa sekarang. Hal ini diperlukan karena adanya pertimbangan semakin luasnya jaringan jalan yang harus dimonitor dan terbatasnya anggaran pemerintah dalam pemeliharaan jalan. Berdasarkan pertimbangan di atas, pengujian kualitas bahan jalan berbasis laboratorium menjadi kurang efektif dan memerlukan biaya yang mahal. Teknik pengujian tanpa merusak (*non destructive testing*,

NDT) pada jalan pasca konstruksi mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan metode konvensional yang bersifat merusak misalnya pengujian laboratorium Marshall, Modulus Resilien, CBR lapangan, dan lain-lain. Pertama, teknik NDT adalah pengujian lapangan tanpa memerlukan sampel dan tidak merusak struktur yang ada. Kedua, teknik NDT ini tidak membutuhkan waktu yang lama dan meminimalisasi gangguan pada lalu lintas pada jalan yang ada.

Hass dan Hudson (1978) membagi teknik NDT untuk evaluasi perkerasan jalan dalam tiga kategori, yaitu pengujian berbasis (1) reaksi terhadap pembebanan dinamis, (2) reaksi terhadap pembebanan secara statis atau terhadap beban yang bergerak perlahan dan (3) reaksi terhadap suatu sumber radiasi nuklir. Salah satu teknik NDT dengan pembebanan dinamis yang berdasarkan pada perambatan gelombang seismik permukaan yang dikenal dengan metode *Spectral Analysis of Surface Waves* (SASW). Teknik SASW merupakan suatu metode pengujian seismik lapangan yang berpotensi untuk mengevaluasi nilai modulus elastisitas dinamik dan ketebalan lapisan struktur perkerasan jalan (Rosyidi *et al.*, 2002). Prinsip utama dari metode SASW adalah sifat penyebaran (dispersif) gelombang seismik permukaan Rayleigh pada nilai frekuensi yang berbeda sesuai dengan respon struktur yang dihasilkan.

1.2. Signifikansi Studi

Teknik SASW yang pertama kali diperkenalkan oleh Nazarian (1984) dan Nazarian dan Stokoe (1984) yang menjelaskan penggunaan SASW kepada analisis nilai kekakuan profil tanah dan perkerasan jalan. Penelitian lanjutan penggunaan SASW pada perkerasan jalan di Indonesia dilakukan oleh Rosyidi *et al.* (2002, 2003, 2004, 2005a, 2005b) dan Rosyidi (2005). Dari hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahwa metode SASW memiliki berpotensi sebagai instrumen untuk menilai kekakuan bahan dengan keakuratan yang baik pada struktur lapisan permukaan (aspal dan beton), lapisan fondasi (atas dan bawah) dan lapisan tanah dasar di perkerasan lentur jalan. Untuk pengembangan studi perkerasan jalan selanjutnya, diperlukan suatu studi untuk menilai potensi metode SASW sebagai teknik evaluasi kekakuan bahan beton perkerasan kaku jalan dan sensitivitas metode ini untuk menilai perubahan pengerasan beton. Studi ini bertujuan untuk menilai perubahan nilai kekakuan (modulus elastisitas dinamik) bahan beton perkerasan kaku pada umur pengerasan yang diamati untuk variasi mutu beton dan ketebalan slab beton menggunakan metode SASW. Profil perkerasan kaku jalan dimodelkan dalam model fisik dengan skala 1 : 1. Faktor-faktor empiris yang mempengaruhi hasil pengukuran SASW meliputi frekuensi respon gelombang, jarak antar sensor dan batasan sumber gelombang yang tepat juga menjadi pengamatan dalam studi ini.

2. STUDI LITERATUR

2.1. Karakteristik Gelombang Rayleigh

Dalam aplikasi bidang geofisik, pemanfaatan gelombang telah memberikan kontribusi yang besar untuk keperluan investigasi permukaan bumi. Kramer (1996) menjelaskan bahwa gelombang seismik yang merambat secara mekanis dalam media dibedakan menjadi dua macam yaitu gelombang badan (gelombang Primer dan gelombang Sekunder) dan gelombang permukaan (gelombang Rayleigh dan gelombang Love). Metode SASW secara prinsipnya mengukur pergerakan gelombang permukaan Rayleigh pada suatu media. Pergerakan gelombang Rayleigh akan berlaku secara menyebar yang merupakan suatu fenomena dari

fungsi kecepatan gelombang terhadap panjang gelombang dan frekuensinya. Sifat penetrasi gelombangnya pada suatu media juga dipengaruhi oleh panjang gelombang dan frekuensi. Panjang gelombang pendek dengan frekuensi tinggi hanya merambat pada permukaan yang dangkal, sedangkan gelombang yang lebih panjang dengan frekuensi rendah dapat merambat lebih dalam (Rosyidi *et al.*, 2002).

2.2. Metode SASW untuk Evaluasi Perkerasan Lentur dan Kaku Jalan Raya

Nazarian dan Stokoe (1984) memulai studinya dengan penerapan metode SASW pada analisis kekakuan bahan perkerasan jalan pada beberapa lokasi jalan di Negara Bagian Texas, USA bersama *The Texas Transportation Institute*. Hasil kajiannya mengindikasikan kemampuan metode SASW untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dinamik lapangan lapisan perkerasan aspal lentur jenis *Hot Mix Asphalt Concrete* (AC) pada nilai antara 314 hingga 605 ksi (1 ksi = 6,895 MPa). Selain itu, beberapa sifat modulus elastisitas lapisan tanah dasar berjenis *sandy gravel* (GR), *sandy clay* (SC) dan *plastic clay* (PC) juga dapat didapatkan dengan masing-masing rentang nilai modulus elastisitasnya antara 25 hingga 33 ksi (GR), 50 hingga 51 ksi (SC) dan 17 hingga 34 ksi (PC).

Penggunaan teknik SASW untuk analisis modulus elastisitas dinamik bahan perkerasan lentur di Malaysia dimulai oleh kelompok peneliti geoteknik dari Universiti Kebangsaan Malaysia (Rosyidi *et al.*, 2002). Rosyidi *et al.* (2002, 2003) dalam kajiannya di perkerasan jalan lentur di Putrajaya, Malaysia dan Universiti Kebangsaan Malaysia menunjukkan bahwa metode SASW dapat mendeteksi secara terinci nilai dinamik bahan berupa kecepatan gelombang geser yang dapat dikonversikan pada nilai modulus geser (*shear modulus*) dan elastisitas dinamik bahan jalan pada setiap perubahan kedalaman profil lapangan. Hasil kajiannya di Jalan Putrajaya menunjukkan bahwa setiap lapisan-lapisan di dalam perkerasan yang memiliki nilai kekakuan yang tidak sama dideteksi dengan jelas. Profil jalan di Putrajaya tersusun dalam 3 lapisan utama perkerasan jalan (lapisan perkerasan, fondasi dan tanah dasar) yang setiap lapisan tersebut tersusun dalam beberapa lapisan dengan nilai kekakuan yang berbeda. Hasil studi tersebut menjelaskan kemampuan metode SASW untuk menganalisis dan pengawasan pekerjaan penghamparan dan pemadatan yang tidak seragam di setiap lapisan perkerasan. Dari hasil studinya juga menjelaskan kemampuan metode SASW untuk mendeteksi ketebalan lapisan permukaan yang tipis (lapisan dengan ketebalan 5 cm). Lapisan permukaan aspal yang terukur memiliki kecepatan gelombang geser antara 800 hingga 1300 m/s (modulus elastisitas hingga $1,1 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$), lapisan fondasi antara 200 hingga 300 m/s (modulus elastisitas berkisar $6 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$) dan lapisan tanah dasar berkisar 100 hingga 290 m/s (modulus elastisitas antara 4×10^6 hingga $1,1 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$).

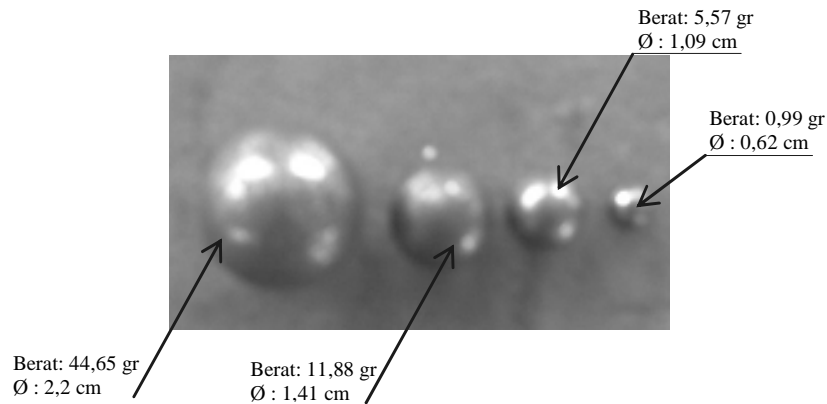
Kajian SASW pada struktur perkerasan kaku pernah dilakukan oleh Rix *et al.* (1990) pada perkerasan kaku jalan di beberapa negara bagian USA. Dalam studinya, Rix *et al.* (1990) melakukan mendeteksi karakteristik waktu perawatan (*curing time*) PCC dengan mutu beton tinggi terhadap nilai parameter dinamikanya. Hasil studinya menjelaskan bahwa metode seismik ini dapat digunakan untuk evaluasi tingkat pengerasan beton campuran beton segar. Nilai parameter dinamik (kecepatan gelombang geser) dari pengujian SASW yang dibandingkan dengan tekan tekan beton uji silinder (*cylinder compression test*) menunjukkan korelasi yang baik.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alat dan Bahan

a. Sumber Gelombang

Untuk mendapatkan perambatan gelombang seismik diperlukan sumber gelombang mekanik (*mechanical transient source*). Dalam penelitian ini digunakan sumber gelombang yang terdiri dari bola baja (*steel ball bearing*) dengan berbagai berat dan ukuran diameter yang bervariasi sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1. Penggunaan bola baja dengan diameter yang berbeda-beda untuk mendapatkan perambatan gelombang yang terbaik (kurva fase yang jelas) yang direkam oleh unit akuisisi. Selain itu, diameter dan berat dari pembangkit gelombang sangat berpengaruh terhadap frekuensi gelombang yang dihasilkan. Untuk mendapatkan sampel gelombang pada lapisan yang tersusun dari bahan beton dengan nilai kekakuan tinggi, penggunaan pembangkit gelombang berfrekuensi tinggi akan menghasilkan data fase gelombang yang baik.

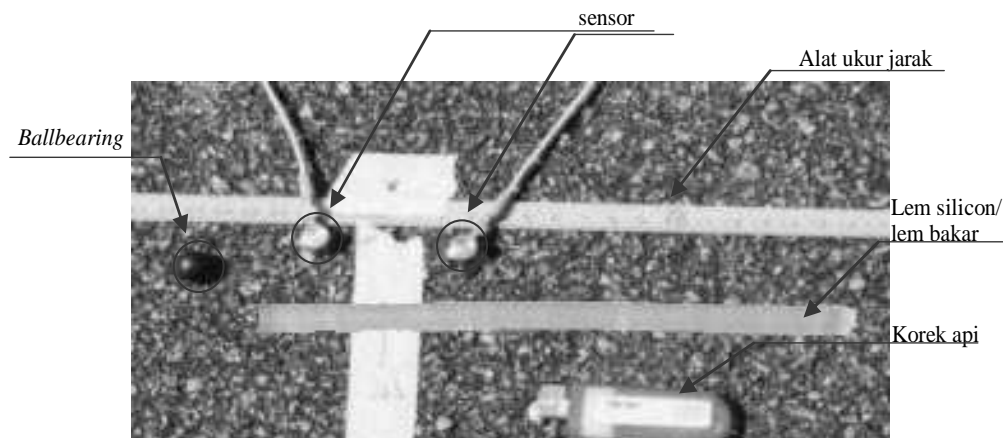


Gambar 1. Bola Baja sebagai Pembangkit Gelombang

b. Sensor Gelombang

Terdapat dua jenis sensor yang biasa digunakan dalam pengujian SASW yaitu transduser kecepatan tegak (*vertical velocity transducer*) atau juga dikenal sebagai geofon (*geophone*) dan transduser percepatan (*acceleration transducer*) yang dikenal sebagai akselerometer (*accelerometre*). Sensor yang digunakan pada penelitian ini adalah sensor pengukur percepatan DJB yang mempunyai kapasitas frekuensi respon 20 kHz, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.

Penggunaan jenis sensor akselerometer terkait dengan pendeteksian respon frekuensi tinggi yang ditimbulkan oleh gelombang Rayleigh ketika melewati slab beton. Sensor diletakkan dengan rekatan (*coupling*) yang baik di atas permukaan model beton. Perekatan sensor di atas permukaan model dihasilkan dengan lem bakar silikon (Gambar 2).



Gambar 2. Sensor Akselerometer, Lem Perekat dan Bola Baja

c. Penganalisis Spektrum (*Spectrum Analyzer*)

Penganalisis spektrum merupakan peralatan osiloskop spektrum data isyarat analog ke digital yang menggunakan basis spektrum operasi *fast Fourier transform* (FFT). Berdasarkan kemampuan penganalisis spektrum ini, isyarat gelombang dalam bentuk amplitudo dan waktu kedatangan dari kedua sensor akan direkam dan dilanjutkan untuk operasi spektrum fase. Penganalisis spektrum yang digunakan dalam penelitian adalah *Harmonie 01 dB* (4 channels) dengan kapasitas sampling frekuensi hingga 50 kHz (Gambar 3). Peralatan penganalisis spektrum terdiri dari satu unit akuisisi (*acquisition unit*) yang dihubungkan dengan komputer melalui *PC card* sebagai konektornya. Untuk pengoperasian unit akuisisi *Harmonie* digunakan *software* dBFA 32, dengan basis operasional sistemnya adalah Windows XP.



Gambar 3. Unit Akuisisi Harmonie

d. Bahan untuk Model Perkerasan Kaku

1). Pasir

Pasir yang digunakan untuk penelitian ini berasal dari sungai Progo, yang berlokasi di Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta.

2). Semen (*Portland Cement*)

Semen adalah bahan ikat hidrolik setelah dicampur dengan air mengadakan pengerasan. Semen yang digunakan untuk penelitian ini adalah *Portland Pozzolan Cement* (PPC) dengan merk Gresik.

3). Batuan (*Aggregate*)

Jenis agregat yang digunakan adalah jenis kricak. Kricak yang digunakan berasal dari Perusahaan Pemecah Batu (*Split*) Bakim yang berlokasi di Clereng, Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Karakteristik fisik dan mekanik bahan agregat dan pasir telah diuji menggunakan standar ASTM untuk syarat-syarat bahan penyusun campuran beton.

4). Air

Dalam pembuatan slab beton ini, air berfungsi sebagai pencampur yang membantu dalam pengadakan pengerasan. Faktor air semen (fas) yang digunakan adalah 0,49. Air yang digunakan telah lolos spesifikasi sebagai air yang bersifat jernih, bersih, dapat diminum dan tidak mengandung zat-zat yang dapat berpengaruh buruk.

3.2 Prosedur Penelitian

Tahapan dalam penelitian ini dibagi dalam beberapa segmen sebagai berikut :

a. Tahapan Persiapan Model Fisik dan Peralatan

Dalam tahapan ini, model fisik perkerasan kaku dipersiapkan mulai dari pemilihan bahan hingga pada pembuatan model. Model perkerasan kaku dibuat dalam dua jenis model fisik skala 1 : 1 yang masing-masing menggunakan mutu beton yaitu K 175 dan K 225. Pada tahap ini juga dilakukan pembuatan sampel silinder untuk mengamati kuat desak beton pada umur pengamatan rencana. Selanjutnya, sebelum pengambilan data, peralatan SASW yang akan digunakan dikalibrasi dahulu untuk mencapai keakuratan data dalam pengukuran. Proses kalibrasi diantaranya dilakukan terhadap sensor gelombang dan unit akuisisi.

b. Tahapan Pengambilan Data SASW

Pengukuran SASW selanjutnya dilaksanakan pada model fisik perkerasan kaku dengan mengamati perubahan pengerasan atau kekakuan beton pada umur pengamatan 3 hari, 7 hari, 10 hari, 14 hari, 17 hari, 21 hari dan 28 hari.

c. Tahapan Pengujian Kuat Desak Beton Model

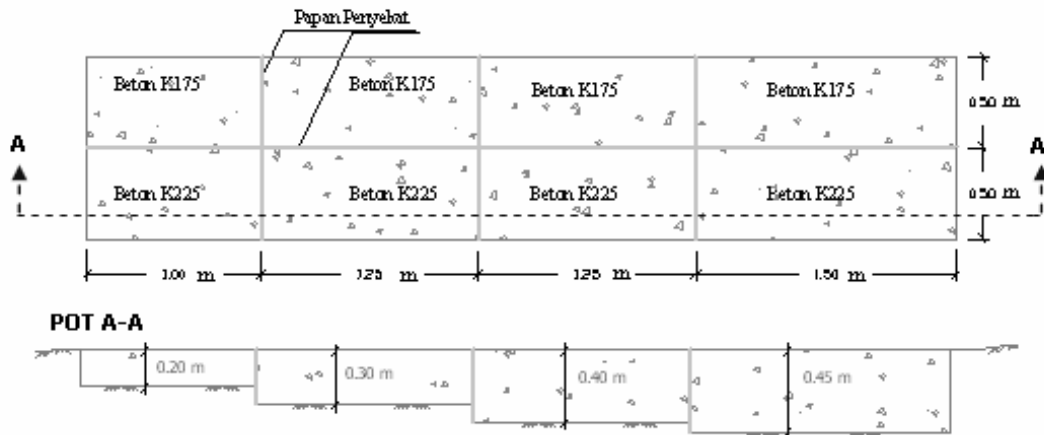
Pada umur pengamatan yang sama, sampel silinder diuji menggunakan alat uji tekan *Wykehan Farrance Slough England* (WFI) dengan kapasitas kuat tekan 2000 kN di Laboratorium Bahan Bangunan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

d. Tahapan Analisis Data

Pada tahapan ini dilakukan analisis terhadap data gelombang yang telah direkam menggunakan metode transformasi *Fourier* untuk menghasilkan spektrum gelombang, metode beda fase untuk membangun kurva dispersi eksperimen gelombang dan metode matrik kekakuan dinamik untuk proses inversi dalam penentuan profil.

3.2.1. Disain Model Fisik Perkerasan Kaku Jalan.

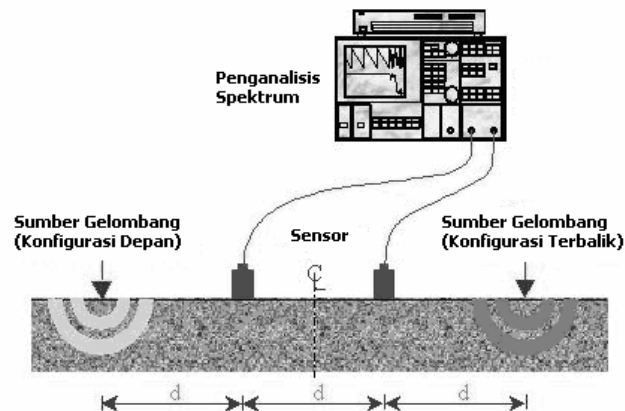
Pelaksanaan penelitian ini didasarkan perubahan kekakuan akibat pengerasan beton pada umur beton yang diamati. Mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan K₁₇₅ dengan perbandingan bahan semen, pasir dan agregat pada 1 : 2 : 3 dan K₂₂₅ dengan perbandingan bahan semen, pasir dan agregat pada 1 : 1,5 : 2,5. Slab beton untuk model fisik perkerasan jalan kaku dibuat dengan dimensi dan variasi nilai ketebalan lapisan sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Skema Model Fisik Slab Beton Perkerasan Kaku

3.2.2. Prosedur Pengambilan Data SASW

Data diperoleh dengan membangkitkan gelombang Rayleigh melalui sumber pembangkit gelombang mekanik yang dibedakan berdasarkan berat serta ukurannya di suatu titik tertentu, pendeteksian pergerakan gelombang melalui sepasang transduser vertikal percepatan (*accelerometer transducer*) dan proses perekaman data oleh penganalisis spektrum gelombang (*spectral analyser*). Konfigurasi pengukuran dan peralatan dalam analisis SASW sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 5. Sepasang sensor dan lokasi sumber gelombang diletakkan dalam satu garis imajiner. Gelombang permukaan dibangkitkan oleh sumber gelombang dengan bola baja yang dijatuhkan secara bebas. Jarak antar sumber gelombang terhadap sensor terdekat dan jarak antar sensor dibuat sama. Dalam penelitian digunakan jarak antar sensor 5, 10, 20 dan 30 cm. Setelah satu set pengukuran dilakukan, sumber gelombang dipindahkan pada posisi yang berlawanan (*reverse profile*) sebagaimana dijelaskan pada Gambar 5. Rata-rata data dari kedua profil tersebut dapat meminimalkan gangguan dari penerimaan fase internal dan kondisi permukaan lapisan dalam yang tidak rata. Selama pengambilan data hasil senantiasa diamati dan pengujian diulang beberapa kali untuk setiap satu set jarak transduser guna memastikan konsistensi pergerakan gelombang yang diterima.



Gambar 5. Konfigurasi Instrumen SASW

3.2.3. Proses Analisis FFT, Spektrum Fase dan Kurva Dispersi Kecepatan Fase

Sinyal pergerakan gelombang yang direkam ditransformasikan dalam domain frekuensi secara otomatis yang ditampilkan dalam spektrum fase fungsi perpindahan (*transfer function*) dan fungsi koheren (*coherence function*).

Spektrum fase fungsi perpindahan, $H(f)$ juga dikenali sebagai fungsi gerak balas/reaksi frekuensi, merupakan perbandingan antara spektrum linier output dan input yang melibatkan bilangan kompleks. Persamaan spektrum dihasilkan dari fungsi spektrum tenaga silang (G_{yx}) dan tenaga autonya (G_{xx}), yang dapat ditulis sebagai :

$$H(f) = \frac{G_{yx}(f)}{G_{xx}(f)} = \frac{A_2}{A_1} \{ \cos(\phi_2 - \phi_1) + i \sin(\phi_2 - \phi_1) \} \quad (1)$$

disini $(\phi_2 - \phi_1)$ adalah perbedaan nilai fase di antara dua komponen gelombang yang ditentukan oleh sudut fase yang diperoleh dari kedua sensor gelombang. Selanjutnya data ini dapat digunakan untuk menghitung kecepatan fase dalam pembuatan kurva dispersi eksperimen dari pengukuran SASW.

Fungsi koheren didefinisikan sebagai perbandingan tenaga output yang disebabkan oleh input terhadap seluruh output yang terukur. Fungsi ini dinyatakan sebagai:

$$\gamma^2(f) = \frac{[G_{yx}(f) \cdot G_{yx}^*(f)]}{[G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)]} \quad (2)$$

disini $\gamma^2(f)$ adalah nilai koheren yang digunakan untuk memastikan korelasi terbaik diantara sinyal input dan output. Nilai koheren ditetapkan sebagai nomor nyata di antara 0 – 1. Stokoe *et al.* (1994) menjelaskan bahwa nilai koheren 1 didefinisikan sebagai nilai perbandingan tertinggi penggabungan sinyal sedangkan nilai yang lebih rendah dari 1 menunjukkan penurunan kualitas sinyal. Al Hunaidi (1992) menyatakan bahwa nilai koheren yang boleh digunakan sebagai parameter pengukuran bagi sinyal yang baik bernilai lebih dari 0.98. Bagaimanapun juga, nilai koheren yang rendah tidak hanya sepenuhnya disebabkan oleh kualitas korelasi yang rendah di antara sinyal. Terdapat beberapa faktor lainnya seperti resolusi lebar jalur frekuensi yang rendah dan sinyal masukan berganda yang menyebabkan nilai koheren yang rendah (Nazarian, 1984).

Bagian terpenting dari proses analisis spektrum ini adalah data perbedaan fase gelombang (ϕ) yang diperoleh dari spektrum fungsi perpindahan. Kurva dispersi eksperimen kecepatan gelombang *Rayleigh* (kecepatan fase) selanjutnya dianalisis dengan menghitung waktu perjalanan gelombang *Rayleigh* (t) berdasarkan persamaan :

$$t = \frac{\phi}{360^\circ} \cdot T \quad (3)$$

dimana $T = 1/f$ = periode yang nilainya tergantung dari frekuensi yang diterima. Selanjutnya kecepatan gelombang *Rayleigh*, V_R , pada jarak di antara dua sensor pada jarak antar sensor tertentu (d), dapat dihitung dengan :

$$V_R = \frac{d}{t} \quad (4)$$

Panjang gelombang *Rayleigh*, L_R , setiap frekuensi yang terukur dapat ditentukan dari :

$$L_R = \frac{V_R}{f} \quad (5)$$

Dengan mengulangi tahapan perhitungan di atas untuk setiap frekuensi terukur lainnya, maka diperoleh kurva dispersi eksperimen (*experimental dispersion curve*) kecepatan gelombang *Rayleigh* (kecepatan fase) terhadap panjang gelombangnya.

3.2.4. Proses Inversi Kurva Dispersi

Tahap ini merupakan proses perhitungan profil kecepatan gelombang geser dan tebal lapisan struktur perkerasan model dari kurva dispersi kecepatan gelombang fase. Pada penelitian ini, proses inversi menggunakan metode matrik kekakuan dinamik dan proses optimasi menggunakan metode kemiripan maksimum (*maximum likelihood*), penjelasan lebih lengkap mengenai kedua metode tersebut dapat merujuk pada Joh (1996); Rosyidi (2004) dan Rosyidi et al. (2005b).

3.2.5. Perhitungan Modulus Elastisitas Dinamik

Modulus elastisitas yang dihasilkan oleh metode SASW memiliki trend konstan di bawah regangan 0,001 % dan nilainya mendekati E maksimal (Nazarian & Stokoe, 1984). Pada kondisi ini, nilai modulus yang bebas terhadap pengaruh amplitudo regangan. Modulus elastisitas dinamik suatu material dihitung berdasarkan persamaan (Yoder & Witzak, 1975) :

$$E = \frac{2\gamma}{g} V_s^2 (1 + \mu) \quad (6)$$

dimana : E = modulus elastisitas dinamik (modulus *Young*), V_s = kecepatan gelombang geser, γ = berat volume total material, g = percepatan gravitasi dan μ = angka Poisson material.

ACI Committee 318 (1995) memberikan persamaan empiris untuk mengukur nilai modulus elastisitas dinamik beton dari hubungan kuat desak beton pada umur 28 hari dan berat volume beton yang dinyatakan sebagai :

$$E_c = 33 \cdot W_c^{1.5} \cdot f_c^{0.5} \quad (7)$$

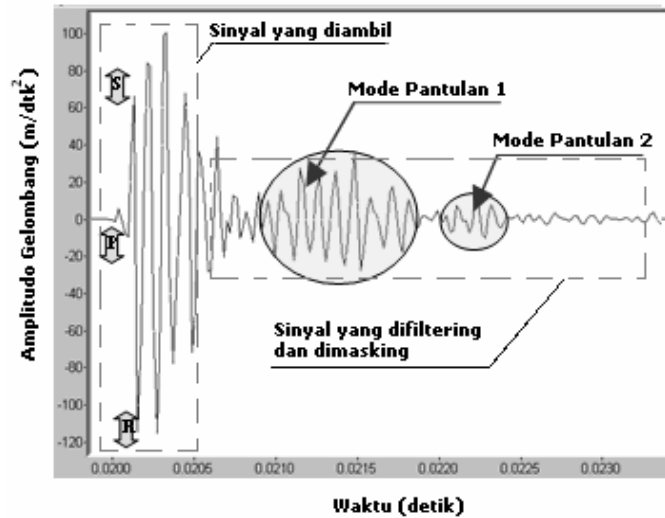
$$E_d = 0,83 E_c \quad (8)$$

dimana : E_c = modulus elastisitas beton (modulus *Young* dalam unit psi), W_c = berat volume beton (dalam unit pcf), f_c = kuat desak beton pada umur 28 hari (dalam unit psi) dan E_d = modulus elastisitas dinamik beton (psi).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

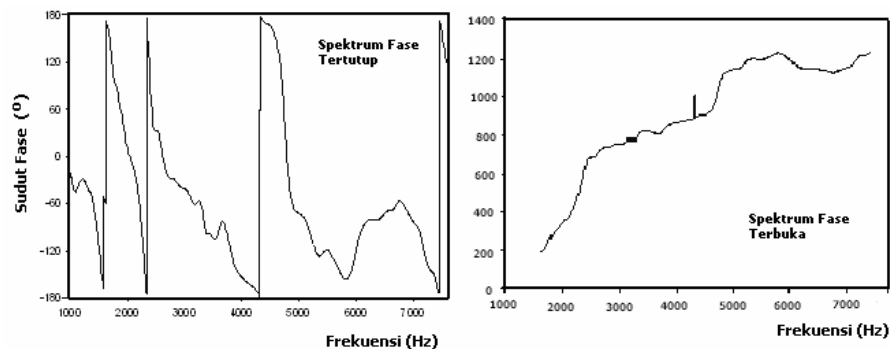
4.1. Profil Kecepatan Gelombang Geser Hasil Pengujian SASW

Hasil pendeteksian gelombang seismik yang bergerak di antara dua sensor dari pengukuran SASW dijelaskan dalam Gambar 6. Data rekaman gelombang menunjukkan bahwa sensor merekam perambatan gelombang tubuh primer (P), sekunder (S) dan gelombang permukaan *Rayleigh* (R). Selain itu dari Gambar 6 juga menunjukkan bahwa sensor juga menerima adanya dua mode gelombang yang disebabkan adanya fenomena pantulan gelombang.

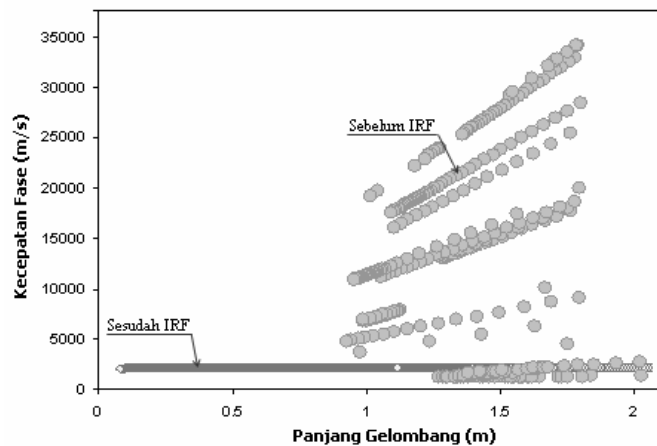


Gambar 6. Rekaman Data Gelombang dari Sensor

Permasalahan yang muncul pada pendeteksian gelombang yang merambat di media berlapis dengan perbedaan kekakuan yang ekstrim sebagaimana terjadi dalam pengukuran SASW pada perkerasan kaku jalan (lapisan slab beton dan lapisan tanah dasar) adalah munculnya mode pantulan gelombang tubuh (Gambar 6) akibat kembalinya sebagian energi gelombang karena memasuki lapisan yang berbeda kekakuannya. Adanya mode ini akan menginterferensi spektrum fase yang ditampilkan menjadi kurang jelas dan terlihat banyak gangguan. Untuk mengatasi hal itu, mode gelombang pantulan perlu disaring (*filtering*) dan ditutup (*masking*). Dalam studi ini, proses penyaringan dan penutupan spektrum yang buruk dilakukan dengan metode *impulse response filtering* (IRF) sebagaimana direkomendasikan oleh Joh (1996) dan Rosyidi (2004). Selanjutnya data gelombang (Gambar 6) melalui penganalisis spektrum berbasis FFT ditransformasikan dalam domain frekuensi untuk ditampilkan dalam spektrum fase fungsi perpindahan tertutup (*wrapped spectrum*) dan spektrum terbuka (*unwrapped spectrum*) sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 7. Informasi yang diperoleh dari spektrum fungsi perpindahan adalah nilai beda fase gelombang yang merupakan representasi dari selisih waktu perambatan partikel gelombang dari sensor pertama menuju ke sensor kedua yang mengindikasikan kecepatan gelombang permukaan yang melewati suatu media.

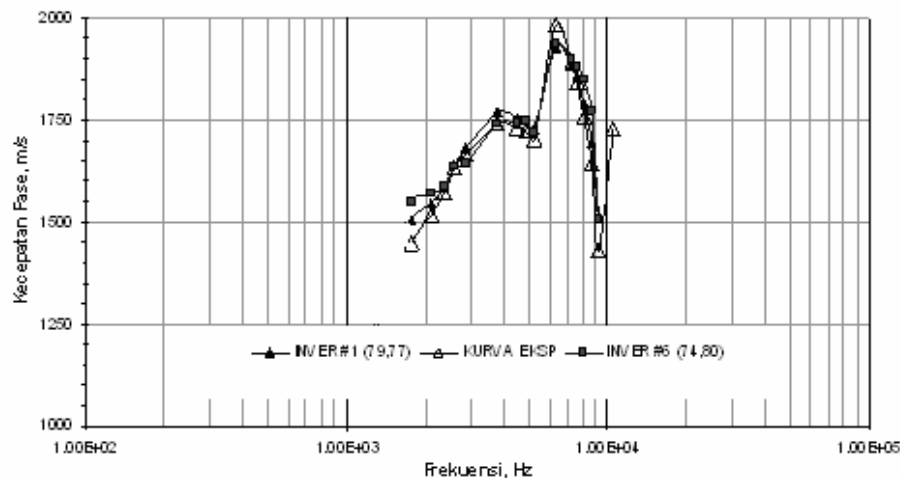


Gambar 7. Spektrum Fungsi Perpindahan (Fase) Tertutup dan Spektrum Fase Terbuka

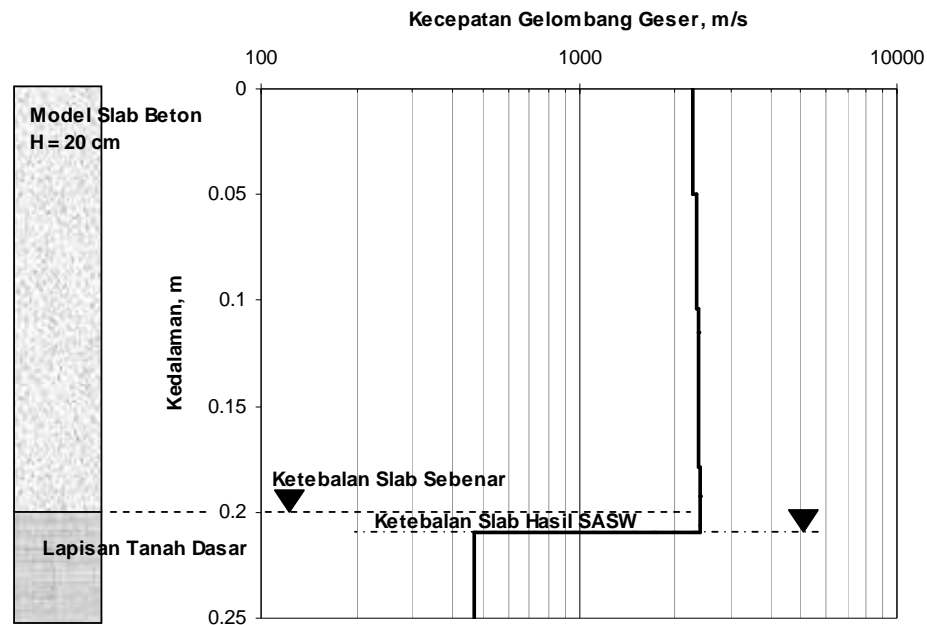


Gambar 8. Kurva Dispersi Kecepatan Fase Eksperimen (Setelah IRF)

Menggunakan data spektrum fase (Gambar 7), dibangun kurva dispersi eksperimen kecepatan fase (Gambar 8). Kurva dispersi eksperimen yang dianalisis merupakan kurva terbaik setelah dilakukan proses IRF yang mana ditunjukkan dalam Gambar 8 memiliki kurva yang cenderung linier dengan nilai kecepatan fase pada wilayah 1.500 hingga 2.000 m/s. Kondisi ini menunjukkan profil beton yang relatif seragam dan monolitik. Dari Gambar 8 juga ditunjukkan perbandingan kurva dispersi setelah melalui proses IRF dan kurva yang dianalisis menggunakan data gelombang tanpa IRF. Mode gelombang pantulan (Gambar 6) ditunjukkan dapat mempengaruhi kurva dispersi yang dihasilkan menjadi memiliki nilai kecepatan fase yang sangat tinggi (lebih dari 5.000 m/s) dan tidak sesuai (*reliable*) untuk profil bahan beton. Selanjutnya, kurva dispersi terbaik dianalisis dalam proses inversi untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser melawan kedalaman. Proses inversi yang dijalankan berbasis matrik kekakuan dinamik dilakukan dengan memodelkan profil beton yang homogen dan monolitik seterusnya dengan perhitungan balik (*backcalculation*) diperoleh kurva dispersi teori. Optimalisasi penyesuaian kurva dispersi teori dan eksperimen (Gambar 9) dilakukan untuk mendapatkan profil akhir. Salah satu hasil akhir profil inversi kecepatan gelombang geser model untuk ketebalan slab 20 cm dengan mutu beton K225 diberikan dalam Gambar 10.



Gambar 9. Perbandingan Kurva Dispersi Teori dan Eksperimen pada Inversi

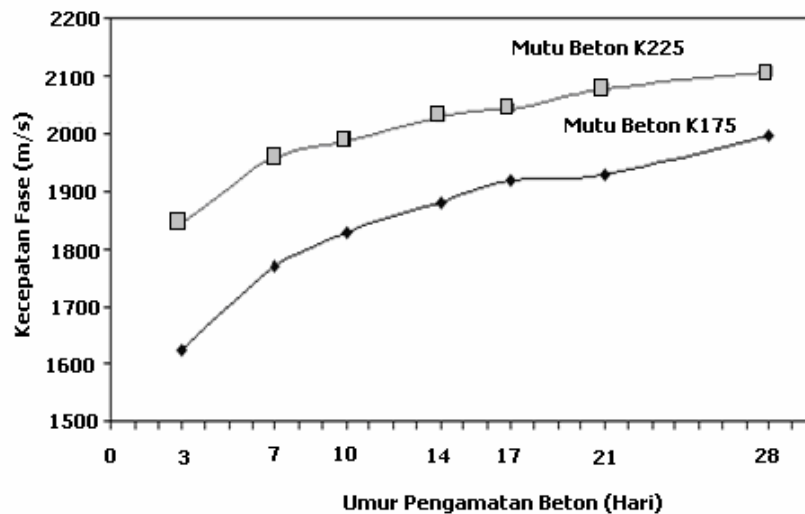


Gambar 10. Profil Perkerasan Kaku Hasil Uji SASW Terhadap Model Fisik

Dari Gambar 10 ditunjukkan bahwa nilai kecepatan gelombang geser untuk slab beton pada umur 10 hari antara 2.272 hingga 2.400 m/s. Nilai kecepatan yang tinggi mengindikasikan sifat bahan yang kaku. Nilai tersebut bersesuaian dengan nilai kewajaran kecepatan gelombang geser untuk beton sebagaimana direkomendasikan oleh Nazarian (1984) untuk beberapa mutu beton pada struktur jalan pada wilayah 2.000 – 2.600 m/s. Ketebalan slab beton hasil pengukuran SASW (20,96 cm) menunjukkan penyimpangan nilai yang relatif kecil (Gambar 10) yaitu sebesar 4,59 % terhadap tebal slab model fisik (20,04 cm). Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan teknik SASW lainnya yang mampu mendeteksi ketebalan perkerasan kaku dengan tingkat selisih yang rendah.

4.2. Pengamatan Perubahan Kekakuan Beton dengan Kecepatan Fase SASW

Kecepatan fase (gelombang Rayleigh) yang dihasilkan dari pengukuran SASW pada umur pengamatan menunjukkan trend kurva yang semakin meningkat dari 3 hari ke 28 hari untuk kedua mutu beton K175 dan K225 (Gambar 11). Hal ini menunjukkan kemampuan parameter dinamik (kecepatan fase) hasil pengukuran metode SASW sebagai indikator pengukur perubahan pengerasan dan kekakuan beton segar secara lebih mudah dalam model perkerasan kaku. Gambar 11 juga menunjukkan perubahan kecepatan gelombang fase yang ekstrim pada pengerasan beton 3 hingga 14 hari, hal ini dindikasikan proses kimiawi laju pengerasan beton masih berjalan internsif. Selanjutnya pada umur di atas 14 hari perubahan nilai kecepatan fase menjadi relatif kecil. Indikasi ini menunjukkan perubahan kekakuan pada waktu pengerasan beton mendekati umur 28 hari cenderung relatif tetap dan menuju pada grafik dengan kelandaian kecil.



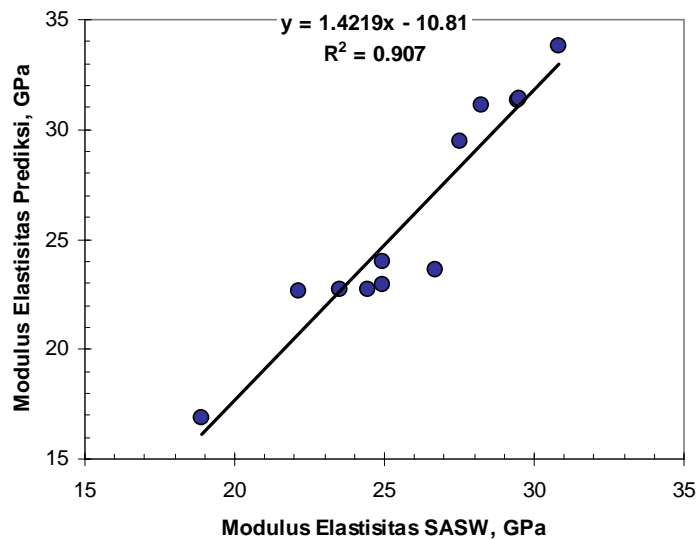
Gambar 11. Pengamatan Nilai Kecepatan Fase Gelombang Terhadap Perubahan Pengerasan Beton Mutu K175 dan K225

4.3. Korelasi Nilai Kekakuan Modulus Elastisitas Dinamik SASW dan Modulus Elastisitas Dinamik Empiris ACI 318

American Concrete Institute (ACI) Committee 318 (1995) merekomendasikan persamaan empiris untuk memprediksi nilai modulus elastisitas dinamik campuran beton berdasarkan kuat desak beton pada umur 28 hari dan berat volume beton sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan (7) dan (8). Modulus elastisitas dinamik dari pengujian SASW pada umur pengamatan pengerasan beton yang diperoleh melalui perhitungan Persamaan (6), dibandingkan dengan nilai modulus elastisitas dinamik empiris ACI 318 yang hasilnya diberikan pada Gambar 12.

Secara keseluruhan persentase perbedaan data modulus elastisitas dari uji SASW dan hasil prediksi ACI 318 adalah kurang dari 15 %, dengan persamaan regresi yang dihasilkan memiliki koefisien determinasi 0,907 ($t = 3,765$, $\alpha = 5\%$). Hasil studi ini menunjukkan bahwa korelasi di antara kedua nilai modulus elastisitas yang dihasilkan memiliki tingkat signifikansi kuat dan sangat bersesuaian.

Tabel 1 menunjukkan perbandingan hasil studi ini terhadap kajian yang dilakukan oleh Nazarian dan Stokoe (1984) dan Rix *et al.* (1990). Nazarian dan Stokoe (1984) melakukan pengukuran SASW pada perkerasan kaku Apron Tyndall AFB, di USA, sedangkan Rix *et al.* (1990) menjalankan studi SASW pada beberapa model slab beton yang diletakkan di atas tanah dasar lempung berlanau di Hronsby Bend, Texas USA. Dari Tabel 1 diperoleh bahwa modulus elastisitas dinamik hasil studi ini memiliki nilai yang rasional untuk model slab beton perkerasan kaku dan bersesuaian dengan studi yang dilakukan oleh Nazarian dan Stokoe (1984) dan Rix *et al.* (1990).



Gambar 12. Hasil Korelasi antara Modulus Elastisitas Dinamik SASW Terhadap Modulus Elastisitas Prediksi ACI 318

Tabel 1. Perbandingan Hasil Studi dengan Kajian yang Dilakukan Nazarian & Stokoe (1984) dan Rix *et al.* (1990)

Nilai Modulus Elastisitas Dinamik Beton	Hasil Studi	Nazarian & Stokoe (1984)	Rix <i>et al.</i> (1990)
	30.89 GPa (umur 28 hari)	19,9 – 64,2 GPa (variasi berbagai mutu beton perkerasan kaku)	27,58 – 38,81 GPa (umur beton 28 hari)

5. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

1. Pengukuran seismik lapangan menggunakan Metode SASW merupakan teknik pengujian yang berpotensi digunakan sebagai teknologi alternatif pengukuran karakteristik kekakuan slab beton perkerasan kaku untuk pengamatan pengerasan beton. Metode SASW bersifat tidak merusak dan tidak memerlukan sampel dalam pengujiannya sehingga secara *portable* dapat digunakan untuk pengujian lokasi-lokasi yang sulit terjangkau oleh peralatan laboratorium lengkap atau pengujian lapangan lainnya.
2. Dari studi SASW terhadap model perkerasan kaku menunjukkan bahwa metode SASW mampu mendeteksi ketebalan slab beton perkerasan kaku dengan tingkat deviasi yang relatif kecil. Selain itu, hasil studi membuktikan bahwa parameter dinamik berupa kecepatan fase gelombang terindikasi mampu dijadikan sebagai parameter kontrol terhadap perubahan sifat kekakuan beton.

3. Nilai modulus elastisitas dinamik slab beton dari pengukuran SASW berkorelasi positif dan signifikan terhadap nilai modulus elastisitas dinamik prediksi dari rumus empiris ACI 318. Hasil studi yang dilakukan menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas dinamik yang dihasilkan bersesuaian dengan hasil studi yang dilakukan oleh Nazarian dan Stokoe (1984) dan Rix *et al.* (1990).
4. Rekomendasi terhadap studi selanjutnya dapat dilakukan dengan melakukan kajian SASW pada model fisik dengan mutu beton yang lebih tinggi dan ketebalan slab yang bervariasi. Untuk menguji validasi kajian SASW perlu dilakukan pengujian dinamik material lainnya diantaranya *ultrasonic test*, *resonance column test* dan *impact echo test*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi penghargaan dan terima kasih kepada Prof.Dr.Nenad Gucunski (Rutgers University, USA) dan Prof.Dr.Sung Ho Joh (Chung Ang University, Korea) serta kolega penulis, Ir. H. Sentot Hardwiyono, MT., yang telah membantu dalam diskusi serta pemahaman mendalam mengenai metode SASW. Penulis juga memberikan penghargaan kepada para asisten peneliti diantaranya Wendy Aryanto, ST., Wawan Kurniawan, ST., Sigit Sunarjati, ST. dan Eko Rahadi, ST., yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini hingga tuntas. Terakhir, penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan Faculty of Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, yang telah memberikan sponsor untuk penelitian studi aplikasi SASW di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318. 1995. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*. American Concrete Institute. Detroit.
- Al-Hunaidi, M.O. 1992. *Difficulties with Phase Unwrapping in Spectral Analysis of Surface Waves Nondestructive Testing of Pavements*. **Canadian Geotechnical Journal** **29**: 506-511.
- Hass, R. & Hudson, W.R. 1978. *Pavement Management System*. McGraw Hill Book Company, New York.
- Joh, S.H. 1996. *Advances in Data Interpretation Technique for Spectral Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements*. Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin.
- Kramer, S.L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey
- Nazarian, S. 1984. *In-situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Wave Method*. Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin.
- Nazarian, S. & Stokoe II, K. H. 1984. *In-situ Shear Wave Velocity from Spectral Analysis of Surface Waves*. **Proc. 8th World Conf. on Earthquake Engineering** **3**, pp. 31-38.
- Rix, G.J., Bay, J.A. & Stokoe II, K.H. 1990. *Assessing in Situ Stiffness of Curing Portland Cement Concrete with Seismic Tests*. **Transportation Research Board** **1284**.
- Rosyidi, S.A. 2004. *Evaluation of the Dynamic Stiffness of Pavement Layer Using SASW Method*. Master of Science Thesis. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Rosyidi, S.A. 2005. *Prospek Pengembangan Teknologi Analisis Gelombang Seismik Permukaan untuk Evaluasi Jalan Pasca Konstruksi di Indonesia*. **Prosiding**

- Konferensi Regional Teknik Jalan ke-8 Wilayah Barat**, 28-29 Juli 2005. Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia (HPJI). Batam
- Rosyidi, S.A., Nayan, K.A.M., Taha, M.R. & Mustafa, M.M. 2002. *The Measurement of The Dynamic Properties of Flexible Pavement using Spectral-Analysis-of-Surface-Wave (SASW) Method*. **Proseding Simposium ke-5 Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi**. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R. & Nayan, K.A.M. 2003. *Determination the Design Input Parameter of Dynamic Elastic Modulus of Road-Pavement Base Layer using Wave Propagation Technique*. **Proseding Konferensi Nasional Teknik Jalan ke-7 (KNTJ-7)**, 7 - 8 Oktober 2003. Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia (HPJI). Jakarta.
- Rosyidi, S.A. & Taha, M.R. 2004. Measurement of Pavement Moduli using Simple Surface Wave Propagation Technique. **Proseding Simposium ke-7 Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi**. Universitas Katolik Parahiyangan. Bandung.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R. & Nayan, K.A.M. 2005a. *Assessing In Situ Dynamic Stiffness of Pavement Layers with Simple Seismic Test*. **Proceeding of International Seminar and Exhibition on Road Constructions**, 26 May 2005. Semarang. p.15-24.
- Rosyidi, S.A., Ikhsan, J. & Siegfried. 2005b. *Simulasi Model Matrik Kekakuan Dinamik 2 D dan 3 D untuk Studi Perambatan Gelombang Rayleigh pada Profil Balok Beton dan Jalan*. Laporan Penelitian Kompetisi Penelitian Dosen (KPD) 2004-2005. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Stokoe II, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A. & Røeset, J.M. 1994. *Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method*. **ISSMFE Technical Committee 10. XIII ICSMFE**. New Delhi. India
- Yoder, E.J. & Witczak, M.W. 1975. *Principle of Pavement Design*. John Wiley & Sons. New York.

RIWAYAT PENULIS

- Sri Atmaja P. ROSYIDI, ST., M.Sc., P.Eng.**, adalah staf pengajar bidang teknik transportasi dengan pengkhususan keahlian studi analitik-mekanistik perkerasan jalan, di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Gendut HANTORO, Ir., MT.**, adalah staf pengajar bidang teknik transportasi di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Prof. Mohd. Raihan Taha, BE(Civil), MS., Ph.D.**, adalah profesor bidang geoteknik di Department of Civil & Structural Engineering, National University of Malaysia.
- Khairul Anuar Mohd. NAYAN, Dip.CE, B.Sc., M.Sc., P.Eng.**, adalah staf pengajar bidang geoteknik di Department of Civil & Structural Engineering, National University of Malaysia.